



## Fiabilité des systèmes mécatroniques en utilisant la modélisation et la simulation

Naima Chouket, Georges Habchi, Christine Barthod, Olivier Duverger

### ► To cite this version:

Naima Chouket, Georges Habchi, Christine Barthod, Olivier Duverger. Fiabilité des systèmes mécatroniques en utilisant la modélisation et la simulation. MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166625

**HAL Id: hal-01166625**

**<https://hal.science/hal-01166625>**

Submitted on 23 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## FIABILITE DES SYSTEMES MECATRONIQUES EN UTILISANT LA MODELISATION ET LA SIMULATION

N. HAMMOUDA, G. HABCHI, C. BARTHOD

Univ. Savoie, SYMME, F-74000 Annecy  
[Naima.chouket@univ-savoie.fr](mailto:Naima.chouket@univ-savoie.fr)  
[Georges.habchi@univ-savoie.fr](mailto:Georges.habchi@univ-savoie.fr)  
[Christine.barthod@univ-savoie.fr](mailto:Christine.barthod@univ-savoie.fr)

O. DUVERGER

CETIM, Maison de la Mécatronique  
5, Chemin de Bellevue - BP 80439  
74944 Annecy-le-Vieux Cedex  
[Olivier.Duverger@cetim.fr](mailto:Olivier.Duverger@cetim.fr)

**RESUME :** *En phase de conception d'un système mécatronique, une étude de la fiabilité est généralement précédée d'une analyse qualitative qui consiste à définir, avec précision, les relations entre le système et son environnement, les différentes fonctions techniques réalisées par le système, les interactions fonctionnelles et collatérales entre ses éléments, et les différents modes de défaillance et leurs effets sur le système. Ces analyses qui sont complémentaires, peuvent permettre, si elles sont réalisées d'une manière pertinente, de modéliser et de simuler un système mécatronique afin de calculer sa fiabilité prévisionnelle, grâce par exemple, aux réseaux de Petri ou aux diagrammes de fiabilité. On propose dans cet article d'appliquer ces deux méthodes de modélisation employées en sûreté de fonctionnement sur un système mécatronique « actionneur intelligent » afin d'évaluer sa fiabilité avec ou non la prise en compte des interactions et selon son profil de mission.*

**MOTS-CLES :** *Démarche, système mécatronique, fiabilité prévisionnelle, modélisation, simulation*

### 1 INTRODUCTION

L'apparition des systèmes mécatroniques depuis une vingtaine d'années peut être considérée comme une révolution pour le monde industriel. L'utilisation de ces systèmes s'est généralisée rapidement et influence actuellement la quasi-totalité des secteurs de l'industrie. Avant d'aborder « la fiabilité » qui est le thème central de cette communication, essayons de faire un tour d'horizons afin de cerner ce que la bibliographie entend par le terme « Mécatronique ». En effet, plusieurs définitions existent. Citons de manière non exhaustive les principales ; la définition du journal international *Mechatronics*, parue pour la première fois en 1991 : “*Mechatronics in its fundamental form can be regarded as the fusion of mechanical and electrical disciplines in modern engineering process. It is a relatively new concept to the design of systems, devices and products aimed at achieving an optimal balance between basic mechanical structures and its overall control*” [9] ; celle du journal international IEEE Transactions on Mechatronics, apparue en 1996 : “*Mechatronics is the synergistic combination of mechanical engineering with electronics and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes*” [2] ; ou bien encore, celle choisie par l'IFAC Technical Committee on Mechatronic Systems, en 2000 : “*Many technical processes and products in the area of mechanical and electrical engineering show an increasing integration of mechanics with electronics and information processing. This integration is between the components (hardware) and the information-driven function (soft-*

*ware), resulting in integrated systems called mechatronic systems*” [5].

D'après la norme NF E-010, la mécatronique est définie comme une « *démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité* » [1].

En termes de propriétés, la bibliographie souligne que les systèmes mécatroniques sont des systèmes complexes et pluri-technologies caractérisés par des aspects hybrides, dynamiques, interactifs et reconfigurables. Les systèmes hybrides sont des systèmes faisant intervenir explicitement et simultanément des phénomènes continus et d'événements discrets [10]. Les systèmes dynamiques sont caractérisés par les relations fonctionnelles entre les composants qui les constituent. Si ces relations restent figées tout au long de la mission du système, le système sera dit statique. Si au contraire, ces relations changent au cours de la mission, le système sera dit dynamique [8]. Le caractère interactif d'un système est défini par l'existence d'interactions physiques et/ou fonctionnelles entre les composants du système. Enfin, les systèmes reconfigurables sont des systèmes capables de modifier leurs structures internes afin d'assurer la réalisation de la fonction [8]. Tous ces caractères doivent être pris en compte lors du développement d'une démarche afin d'assurer la fiabilité de ces systèmes.

L'un des problèmes majeurs rencontrés lors de la phase de conception des systèmes mécatroniques concerne l'évaluation de la fiabilité mais aussi l'approche selon laquelle cette fiabilité sera étudiée pour être évaluée. En

effet, même si les méthodes existantes rattachées au domaine de la fiabilité sont nombreuses, elles concernent principalement les technologies électronique et mécanique (rarement le logiciel), et sont appliquées de manière indépendante à ces technologies sans tenir compte de l'intégration en synergie du produit mentionnée précédemment dans les définitions de la mécatronique. Durant ces dernières années, peu de travaux ont abordé cette thématique scientifique, citons les deux principales thèses qui ont traité de l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques par A. Demri [3] et A. Mihalache [7]. A. Mihalache a développé une méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle, expérimentale et opérationnelle alors que A. Demri s'est intéressé uniquement à la fiabilité prévisionnelle en prenant en compte la dynamique de ces systèmes. Même si ces travaux sont importants pour la communauté scientifique, ils ont néanmoins ignoré les autres caractères tels que reconfigurable, hybride et interactif qui sont à notre sens des caractères essentiels et nécessaires à l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques.

A l'heure actuelle et malgré les travaux consentis depuis une dizaine d'années, il n'existe pas à notre connaissance d'approche permettant d'étudier la fiabilité d'un système mécatronique tout en prenant en considération l'ensemble des caractères mentionnés ainsi que les interactions générées entre les différentes parties technologiques. De plus, en raison de la complexité du domaine d'étude, les manques dans ce domaine sont nombreux et touchent plusieurs aspects : nombre croissant et éparpillement des méthodes, technologies nombreuses et différentes, plusieurs phases dans la vie du système, considération de l'aspect qualitatif et quantitatif, diversité des outils scientifiques disponibles, objectifs de l'étude, etc.

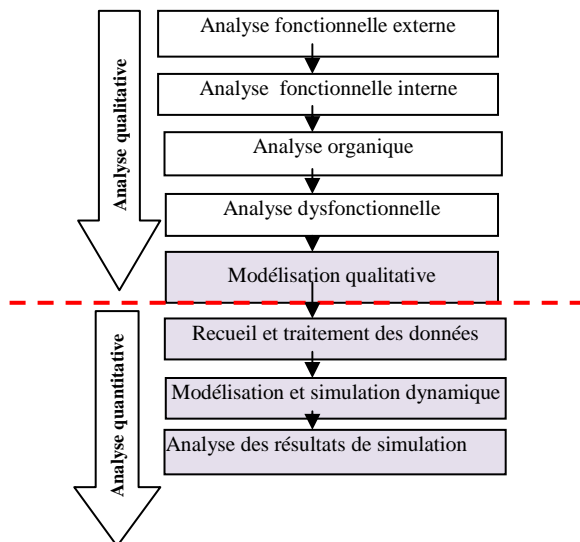


Figure 1 : Démarche globale d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques

C'est sur cette problématique que nous avons proposé une approche globale pour étudier la fiabilité des systèmes mécatroniques pendant la phase de conception tout en prenant en considération les différents caractères ainsi

que les interactions entre les différentes technologies et les besoins du secteur industriel concerné. La démarche proposée comporte un aspect qualitatif et un aspect quantitatif [6] comme illustré sur la figure 1.

Dans cet article, on se contente de présenter une partie de la démarche en s'intéressant à la manière dont on modélise un système mécatronique « Actionneur intelligent » avec la prise en compte des interactions.

## 2 APPLICATION DE LA DEMRACHE A UN SYSTEME MECATRONIQUE

Comme exemple de système mécatronique, on se propose un système « actionneur intelligent » présenté sur la figure 2. Ce dernier produit de la société Pack'Aero, est destiné à la réalisation de la fonction de déchargement de wagonnets. Le doigt de l'actionneur se met en obstacle pour ouvrir le volet et libérer le chargement du wagonnet sans arrêt.

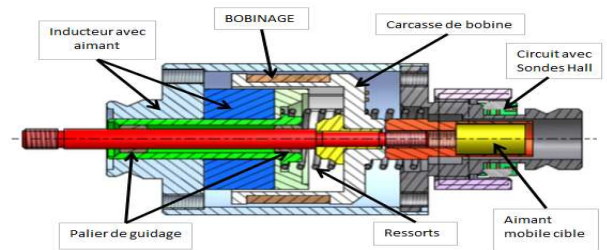


Figure 2 : Actionneur intelligent

L'architecture organique a pour objectif de décomposer le système en sous-systèmes et composants comme le montre la table 1.

	Sous-systèmes	Composants
Actionneur intelligent		Alimentation régulée
	Carte de commande et de diagnostic	Microcontrôleur (HW+SW)
		Capteur de courant
		Pont en H
	Carte de conditionnement de la sonde à effet Hall	Carte conditionnement de la sonde à effet Hall
	Corps de l'actionneur	Palier de guidage
		Sonde (capteur à effet Hall)
		Inducteur avec aimant
		Ressort de rappel
	Equipage mobile	Bobine +carcasse bobine
		Aimant (capteur à effet Hall)
		Tige
		Poussoir (butée)
	Faisceaux électriques	Alimentation électrique / corps actionneur
		Alimentation entre la carte et l'équipage mobile
	Support mécanique de la carte électronique /corps de l'actionneur	Support mécanique carte électronique /corps de l'actionneur
	Fixation du corps de l'actionneur sur la machine	Fixation du corps de l'actionneur sur la machine

Tableau 1 : Composition de l'actionneur intelligent

Le *profil de mission* détermine les conditions d'utilisation du produit. Pour l'actionneur intelligent, les niveaux d'ambiance thermique étant organisés comme suit : 3 mois de fonctionnement en phase « tempéré », 4 mois en phase « froid », 3 mois en phase « tempéré » et 2 mois en phase « chaud ». Le facteur d'influence des différentes phases de fonctionnement étant la température, son évolution au cours du profil de mission est représentée en fonction du temps en Figure 3.

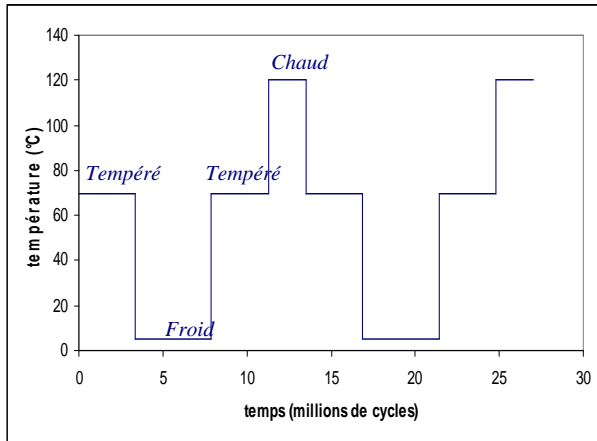


Figure 3 : Succession des phases dans le profil de mission de l'actionneur intelligent

Le profil utilisé dans cette étude est présenté dans le Tableau 2, en heures de fonctionnement et en nombre de cycles pour un an d'utilisation.

Phases du profil	Durée (h)	Durée (cycles)	Durée de fonctionnement (h)	Durée (%)	Nombre de cycles (%)
Tempéré	1565	3 380 400	38	0,43%	25%
Froid	2087	4 507 200	50	0,57%	33%
Tempéré	1565	3 380 400	38	0,43%	25%
Chaud	1043	2 253 600	25	0,29%	17%
Arrêt	2500	0	8610	98,28%	0%
	<b>8760</b>	<b>13 521 600</b>	<b>8760</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Tableau 2 : Profil de mission annuel de l'actionneur intelligent

## 2.1 Modélisation qualitative

Cette étape de *l'analyse qualitative* a pour objectif de modéliser le comportement fonctionnel et dysfonctionnel de l'actionneur intelligent. Pour ce faire, nous nous appuyons sur les différentes étapes de la démarche proposée et particulièrement les analyses fonctionnelle et dysfonctionnelle ainsi que le schéma organique.

L'étude de l'AMDEC enrichie de la classification des modes de défaillance des composants en fonction de leur nature (première ou seconde), de leur rapidité de manifestation (soudaine, progressive) et de leur amplitude (partielle ou complète) nous impose d'introduire des modes de défaillance et des états supplémentaires. En

effet, les modes de défaillance communément utilisés dans les modélisations sont des modes de défaillance première. Afin de prendre en compte les interactions induisant des dommages collatéraux, les modes de défaillance seconde doivent être ajoutés.

De même, les états « fonctionnement », « panne », « repos » et « réparation » doivent être enrichis de l'état « dégradé » qui permet de tenir compte de l'amplitude de la défaillance. Un état « dégradé » est donc défini comme un état dans lequel les caractéristiques de l'élément sont altérées : l'élément reste fonctionnel mais admet des performances moindres. Il s'agit donc d'un état fonctionnel intermédiaire qui se situe d'un point de vue performance entre l'état de fonctionnement normal et l'état de panne pendant lequel le système est indisponible à cause d'une défaillance. Il en découle que le mode « réparation » doit également évoluer pour permettre la réparation de façon anticipée à la panne. Un nouveau mode de réparation est donc introduit : le mode « réparation dégradé », alors que le mode communément nommé « réparation » devient « réparation panne ».

Les éléments qui seront pris en compte pour la modélisation du système sont : la carte de commande et de diagnostic de l'actionneur, la carte de conditionnement de la sonde à effet Hall, la sonde à effet Hall, la bobine, l'inducteur avec aimant, et le palier de guidage. D'après l'expérience de l'industriel, les autres composants ; la tige, l'aimant, le poussoir et le ressort sont supposés être fiables à 100%.

D'après les différentes analyses réalisées auparavant, le modèle proposé est de type série puisqu'une défaillance de l'un des éléments provoque la défaillance de l'actionneur intelligent. Afin d'évaluer l'influence des interactions éventuelles sur la défaillance de l'actionneur, nous proposons de considérer dans notre modèle l'interaction Palier de guidage/Bobine. Ce choix est justifié par la criticité de ces deux composants selon l'expérience de l'industriel.

Les figures 3, 4, et 5 présentent respectivement une modélisation qualitative du palier seul, de la bobine seule et des deux éléments avec prise en compte de l'interaction entre les deux. Les états considérés pour les différents éléments sont alors :

Actionneur : état repos, état fonctionnement, état panne (quelle que soit la phase du profil de mission), état réparation et état dégradé ;

Sous-ensemble : état repos, état fonctionnement, état panne (en fonction de la phase « tempéré », « froid » ou « chaud »), état réparation et état dégradé.

### 2.1.1 Modélisation qualitative de la bobine

La Figure 4 présente le modèle fonctionnel et dysfonctionnel de la bobine seule.

Pour modéliser la bobine, nous avons considéré trois états (fonctionnement, dégradé et panne), un mode de défaillance (défaillance intrinsèque) et un mode de réparation (réparation panne). Lorsque la bobine est considérée seule, l'état dégradé n'apparaît pas car il est

induit par l'interaction palier/bobine qui introduit une défaillance de nature seconde.

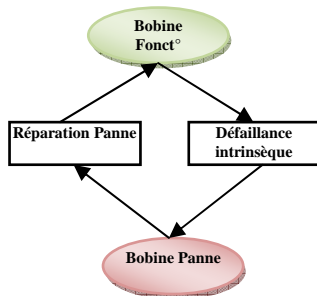


Figure 4 : Model fonctionnel et dysfonctionnel de la bobine

L'interaction n'étant pas prise en compte dans ce premier modèle, le passage d'un état de fonctionnement à un état de panne se produit uniquement suite à l'occurrence du mode de défaillance « défaillance intrinsèque ».

Le mode « réparation panne » permet de faire fonctionner de nouveau la bobine.

### 2.1.2 Modélisation qualitative du palier de guidage

La Figure 5 présente le modèle fonctionnel et dysfonctionnel du palier de guidage seul.

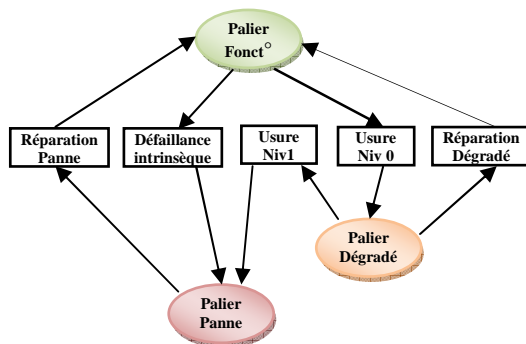


Figure 5 : Modèle fonctionnel et dysfonctionnel du palier de guidage

Pour modéliser le palier de guidage, nous avons considéré trois états (fonctionnement, dégradé et panne), trois modes de défaillance (défaillance intrinsèque, usure palier niveau 0 et usure palier niveau 1) et deux modes de réparation (réparation palier panne et réparation palier dégradé). Ces trois modes de défaillances sont de nature première. L'introduction des modes « usure niveau 0 » et « usure niveau 1 » permet de modéliser la défaillance du point de vue de sa rapidité de manifestation. Les amplitudes des modes sont également prises en compte : les modes « défaillance intrinsèque » et « usure niveau 1 » sont des modes de défaillance complète, alors que le mode « usure niveau 0 » est un mode de défaillance partielle.

Le passage de l'état « palier fonctionnement » à l'état « palier dégradé » se produit donc à travers le mode de défaillance « usure niveau 0 » (lorsque l'actionneur intelligent atteint un nombre supérieur à 6 millions de cycles). L'état dégradé du palier pour une température supérieure à 120°C (profil chaud) va entraîner un nouveau mode de défaillance qui est « usure niveau 1 ». Le passage de l'état « palier fonctionnement » ou de l'état « palier dégradé » à l'état « palier panne » se produit lorsque l'amplitude de la défaillance est complète c'est-à-dire lorsque les modes de défaillance « usure niveau 1 » ou « défaillance intrinsèque » sont atteints.

### 2.1.3 Modélisation qualitative du sous-ensemble Palier/Bobine

La Figure 6 présente le modèle qualitatif du palier et de la bobine avec prise en compte de **l'interaction Palier/Bobine**. L'état dégradé du palier a un impact direct sur le fonctionnement de la bobine. En effet, pour une température supérieure à la température nominale égale à 120°C pour le profil chaud, atteinte suite à l'échauffement du palier en mode dégradé, le fonctionnement de la bobine devient anormal (bobine en état dégradé). Au cours du temps l'état dégradé de la bobine va provoquer une panne de celle-ci à cause de son échauffement excessif.

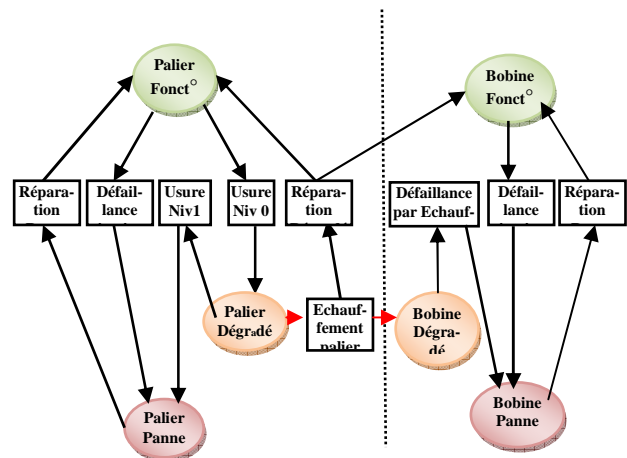


Figure 6 : Modèle fonctionnel et dysfonctionnel du palier de guidage et de la bobine

La prise en compte de l'interaction entre les deux composants impose de définir de nouveaux états et modes de défaillance : un état d'amplitude partielle qu'on nomme « bobine dégradée » ; et deux modes de défaillance seconde qu'on nomme « échauffement palier » et « défaillance par échauffement ».

L'état « palier dégradé » provoque l'échauffement du palier qui va mettre la bobine en état « bobine dégradée ». Le mode « réparation dégradée » du palier remet en fonctionnement la bobine et le palier de guidage.

L'état « défaillance par échauffement » de la bobine est un mode de dégradation complète qui entraîne donc celle-ci à un état de panne.



### 2.1.4 Modélisation qualitative de l'actionneur intelligent

L'état initial de l'actionneur est l'état « repos ». Lorsqu'on appuie sur la consigne (mode ON), le système et ses éléments sont mis en état de fonctionnement. Lorsqu'un élément tombe en panne, le système aussi tombe en panne. Une fois que l'élément défaillant est réparé, le système redevient fonctionnel.

Les modèles qualitatifs des autres composants (sonde à effet Hall, carte de commande et de diagnostic, carte de conditionnement et inducteur avec aimant) considérés seuls sont identiques à celui de la bobine considérée seule.

### 2.2 Recueil et traitement des données des composants

Cette étape consiste à faire un choix judicieux de la loi de fiabilité et de ses paramètres, associée à chaque composant afin de réaliser les étapes de modélisation et de simulation.

Composant	Loi utilisée	Paramètres
Carte conditionnement	Exponentielle	$\lambda = 46,3 \cdot 10^{-13}$ déf/cycle (tempéré)
Carte commande et diagnostic		$\lambda = 1,13 \cdot 10^{-13}$ déf/cycle (froid)
		$\lambda = 797 \cdot 10^{-13}$ déf/cycles (chaud)
		$\lambda = 50,5 \cdot 10^{-13}$ déf/cycle (tempéré)
Bobine		$\lambda = 2,55 \cdot 10^{-13}$ déf/cycle (froid)
		$\lambda = 5 \cdot 380 \cdot 10^{-13}$ déf/cycle (chaud)
		$\lambda = 739 \cdot 10^{-12}$ déf/cycle (tempéré)
		$\lambda = 8.17 \cdot 10^{-12}$ déf/cycle (froid)
		$\lambda = 23 \cdot 600 \cdot 10^{-12}$ déf/cycle (chaud)
Inducteur avec aimant		$\lambda = 378 \cdot 000 \cdot 10^{-12}$ déf/cycle (chaud)
		$\lambda = 6 \cdot 050 \cdot 000 \cdot 10^{-12}$ déf/cycle (chaud)
		$\lambda = 753 \cdot 10^{-12}$ déf/cycle (tempéré)
Palier de guidage		Weibull
	$\lambda = 23 \cdot 600 \cdot 10^{-12}$ déf/cycle (chaud)	
	MTTF= 0.90 10 <sup>9</sup> cycles ; $\beta$ =2.5 (tempéré)	
	MTTF= 8.10 10 <sup>10</sup> cycles ; $\beta$ =2 (froid)	
Sonde à effet Hall	Exponentielle	MTTF= 2.82 10 <sup>7</sup> cycles ; $\beta$ =1.5 (chaud)
		MTTF=7.98 10 <sup>6</sup> cycles ; $\beta$ = 1.5 (chaud)
		MTTF= 10 <sup>5</sup> cycles ; $\beta$ = 1.5 (chaud)
		$\lambda = 5.61 \cdot 10^{-11}$ déf/cycle

Tableau 3 : Lois et valeurs des paramètres associés et utilisés pour le calcul de fiabilité des composants

Pour les composants électroniques, nous avons attribué la loi exponentielle et nous avons calculé son paramètre « taux de défaillance » par la méthodologie FIDES [4]. Pour les composants électriques, nous avons attribué la loi exponentielle et nous avons calculé leurs taux de

défaillance à partir de la loi d'Arrhenius. Pour les composants mécaniques, nous avons attribué la loi de Weibull avec deux paramètres  $\eta$  et  $\beta$ .

Le tableau 3 présente la loi de fiabilité et les paramètres à renseigner pour chaque élément de l'actionneur selon sa technologie. Il est important de noter que les valeurs prises dans le tableau ne correspondent pas aux valeurs réelles des composants.

### 2.3 Modélisation et simulation

Deux types de méthodes de calcul sont mises en œuvre :

- La modélisation utilisant les réseaux de Petri pour la modélisation comportementale de l'actionneur et la simulation Monte Carlo pour la répétabilité et la convergence des résultats,
- Le calcul exact fondé sur la méthode des diagrammes de fiabilité.

La confrontation des résultats obtenus par les deux méthodes est nécessaire afin de vérifier et valider d'une part, le modèle de réseau de Petri et les paramètres de simulation choisis ; d'autre part, la méthode de calcul développée dans le cadre des diagrammes de fiabilité en considérant le profil de mission et les interactions.

Le calcul exact en utilisant les diagrammes de fiabilité aussi bien que la simulation à l'aide des RdP et Monte-Carlo ont pour objectif d'estimer l'évolution de la fiabilité de l'actionneur et de ses composants à travers le temps.

Afin de réaliser la simulation du comportement de l'actionneur intelligent, nous avons implémenté le modèle qualitatif du système dans le logiciel MOCA-RP. Ce logiciel est intégré dans l'espace de travail GRIF commercialisé par l'entreprise TOTAL. Il permet de modéliser le comportement fonctionnel/dysfonctionnel de l'actionneur à l'aide des réseaux de Petri afin d'estimer sa fiabilité. Le diagramme de fiabilité de l'actionneur intelligent a été réalisé en utilisant l'outil Adonis.

### 2.4 Résultats de fiabilité

Dans ce paragraphe, sont présentés les résultats des calculs de fiabilité de l'actionneur et de ses composants avec et sans prise en compte de l'interaction palier/bobine selon les différentes phases du profil, afin de mettre en évidence, d'une part, l'effet de la température sur la fiabilité du système (et donc l'intérêt de modéliser le profil de mission du système), d'autre part, l'effet de la prise en compte de l'interaction choisie. Ces résultats ont été obtenus par les deux méthodes.

#### 2.4.1 Fiabilité de l'actionneur phase/phase du profil

Dans ce paragraphe, sont présentés les résultats de fiabilité pour l'actionneur intelligent dans ses trois phases d'utilisation (tempéré, froid, chaud) de manière indépen-

dante, pendant dix ans, en prenant ou non en compte l'interaction palier/bobine.

La Figure 7 présente l'évolution de la fiabilité de l'actionneur intelligent en fonction du nombre de cycles de fonctionnement pour les trois phases d'utilisation sans prise en compte de l'interaction.

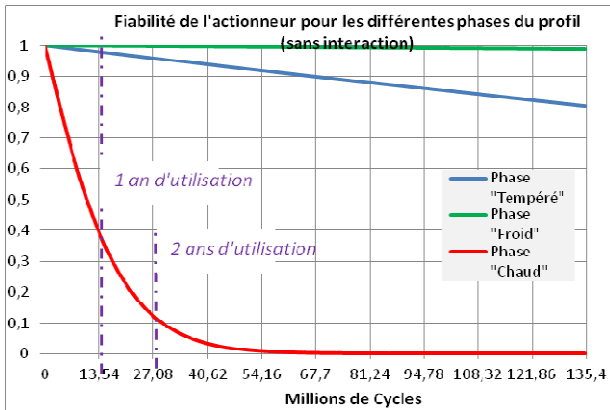


Figure 7 : Fiabilité de l'actionneur intelligent dans ses phases d'utilisation pendant 10 ans **sans prise en compte de l'interaction palier/bobine**

La fiabilité de l'actionneur en fonctionnement profil chaud est plus faible que celle en fonctionnement profil tempéré et profil froid. La température d'utilisation du système a un impact sur sa fiabilité.

Au bout d'un an de fonctionnement en profil chaud uniquement, la probabilité de défaillance de l'actionneur est d'environ 60% (4 actionneurs sur 10 fonctionnent encore) alors qu'elle est de l'ordre de 2% pour le profil tempéré et de 0% pour le profil froid.

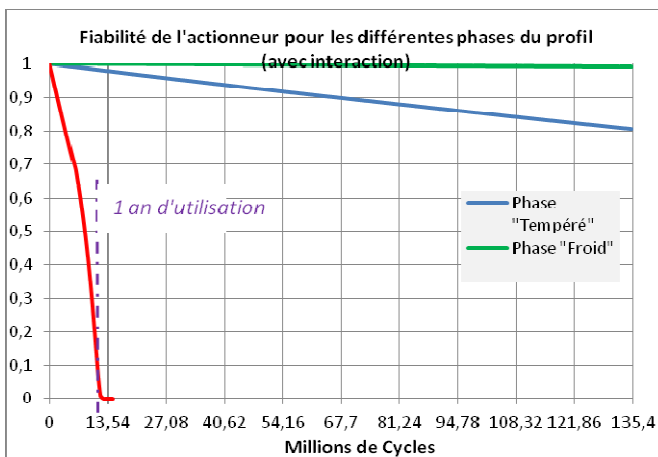


Figure 8 : Fiabilité actionneur intelligent dans ses phases d'utilisation pendant 10 ans **avec prise en compte de l'interaction palier/bobine**

La Figure 8 présente l'évolution de la fiabilité de l'actionneur intelligent en fonction du nombre de cycles de fonctionnement pour les trois phases d'utilisation avec prise en compte de l'interaction palier/bobine, obtenue avec le diagramme de fiabilité sur Adonis. Le RdP

et la simulation Monte-Carlo présentent certains inconvénients lorsque l'occurrence d'un événement est rare comme c'est le cas ici. En effet, la période pendant laquelle l'interaction est observée, est courte.

D'abord, nous remarquons que les courbes de fiabilité de l'actionneur pour les profils tempéré et froid sont identiques à celles obtenues pour le cas sans interaction. En effet, l'interaction palier/bobine n'a aucune conséquence sur ces deux profils. Ensuite, l'influence de l'interaction palier/bobine est particulièrement visible sur la fiabilité de l'actionneur en fonctionnement profil chaud. En effet, dès 6 millions de cycles de fonctionnement la fiabilité chute rapidement pour atteindre zéro avant la fin de la première année de fonctionnement (en fin de première année, 100% des actionneurs sont défaillants en fonctionnement profil chaud).

Les différentes courbes donnant l'évolution de la fiabilité de l'actionneur en fonction du temps montrent que la phase de fonctionnement de l'actionneur en profil chaud est déterminante sur le résultat. Nous étudions donc plus précisément le comportement des différents éléments de l'actionneur dans cette condition de fonctionnement.

#### 2.4.2 Fiabilité des composants en fonctionnement profil chaud

La Figure 9 présente la fiabilité de l'actionneur et de ses composants en fonctionnement profil chaud sur 10 ans et sans prise en compte de l'interaction palier/bobine.

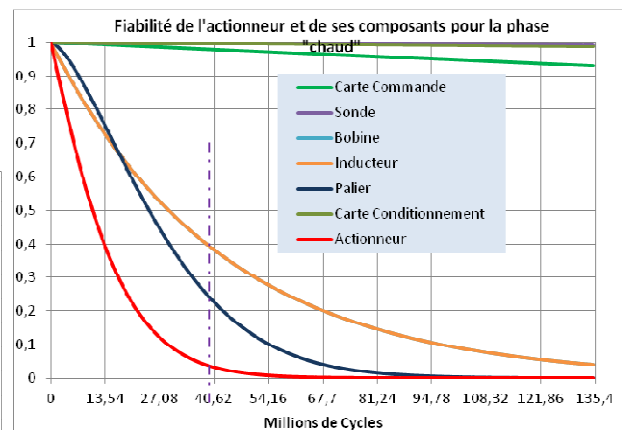


Figure 9 : Fiabilité de l'actionneur intelligent et de ses composants **sans interaction palier/bobine** en fonctionnement profil « chaud » pendant 10 ans

Les composants critiques de l'actionneur intelligent sont le palier de guidage, la bobine et l'inducteur avec une évolution rapide pendant les 40 premiers millions de cycles (3 premières années).

La Figure 10 présente la fiabilité de l'actionneur et de ses composants pendant 10 ans de fonctionnement profil chaud avec prise en compte de l'interaction palier/bobine. Ces résultats sont également obtenus avec les diagrammes de fiabilité (Adonis) pour les mêmes raisons citées précédemment.

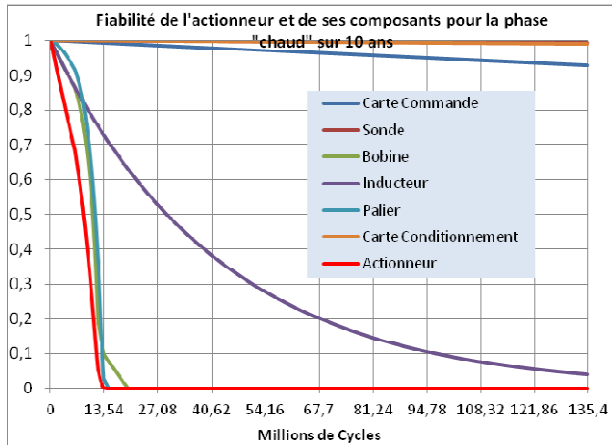


Figure 10 : Fiabilité de l'actionneur intelligent et de ses composants **avec interaction palier/bobine** en fonctionnement profil « chaud » pendant 10 ans

La prise en compte de l'interaction apparaît nettement sur les composants bobine et palier de guidage concernés par l'interaction : la fiabilité de ces deux composants critiques est fortement affaiblie du fait de l'interaction. Cette baisse est bien visible à partir de 6 millions de cycles (usure niv0) puis à partir de 12 millions de cycles (usure niv1).

#### 2.4.3 Fiabilité de l'actionneur et de ses composants selon le profil de mission

Les précédentes courbes montraient la fiabilité de l'actionneur et de ses composants durant les phases du profil de mission une à une de manière indépendante. Toutefois, il est à noter que l'actionneur fonctionnera dans la réalité selon un profil de mission où les phases se succèdent les unes après les autres selon une séquence prédéfinie (tempéré, froid, tempéré, chaud, tempéré, froid, etc.) (Figure 3). Dans ce sens, il est important d'étudier la fiabilité de l'actionneur selon cette séquence c'est-à-dire selon le profil de mission.

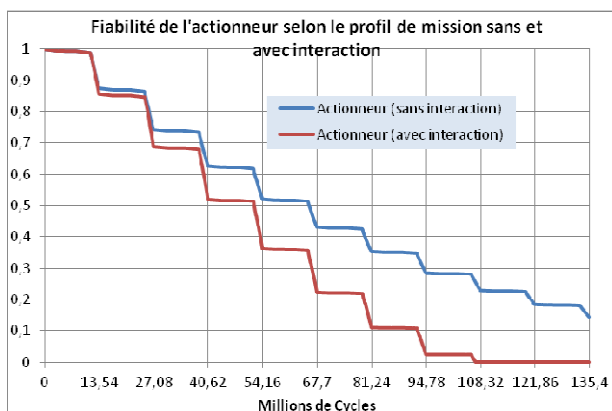


Figure 11 : Fiabilité de l'actionneur intelligent en fonction du **profil de mission sans et avec interaction**

La Figure 11 présente la fiabilité de l'actionneur avec et sans prise en compte de l'interaction en fonctionnement selon le profil de mission défini sur 10 ans d'utilisation.

En considérant les courbes de la Figure 11, nous pouvons faire l'analyse suivante :

- Quelle que soit la courbe de fiabilité considérée, avec ou sans interaction, nous observons une courbe en escalier. Cette allure est la traduction directe de l'effet des différentes phases du profil de mission, donc de la température, sur la fiabilité et par conséquent sur le changement de pente. Une pente quasiment horizontale correspond à la fiabilité pendant la phase du profil « froid », une pente très légèrement inclinée correspond à la phase « tempéré » et une pente fortement inclinée correspond à la phase « chaud ».
- La prise en compte de l'interaction palier/bobine agit directement sur la fiabilité de l'actionneur. En effet, celle-ci commence à se dégrader dès le début de la 2ème année (13,5 millions de cycles) avec une baisse d'environ 0,02 (2%).
- Après un temps de fonctionnement de 10 millions de cycles correspondant à l'objectif MTTF de l'actionneur, la fiabilité est de l'ordre de 0,991, sans et avec interaction. On peut supposer que l'objectif est largement atteint car 1 seul actionneur sur 100 serait défaillant.
- Si on considère l'objectif de durée de vie qui est de 10 ans pour l'actionneur, nous pouvons observer que 10 à 15% des actionneurs atteignent cet objectif en cas de non prise en compte de l'interaction palier/bobine (donc durée de vie maximale supérieure à l'objectif). Par contre, lorsque l'interaction est prise en compte la durée de vie maximale est de l'ordre de 100 millions de cycles (objectif non atteint).

En approfondissant l'analyse des courbes de fiabilité de l'actionneur par recherche de modèles de fiabilité et en utilisant le logiciel ADONIS, nous obtenons les modèles de types Weibull proposés en Figure 12. Ainsi, la fiabilité de l'actionneur fonctionnant selon le profil de mission, sans et avec interaction, peut être modélisée à l'aide du modèle de Weibull avec les paramètres définis dans le Tableau 4. Cette modélisation prouve que l'objectif MTTF de 10 millions de cycles est largement dépassé dans les deux cas sans interaction (72,81 millions de cycles) et avec interaction (48,97 millions de cycles).

Modèle de WEIBULL	Beta	Eta (millions de cycles)	Gamma (millions de cycles)	Moyenne (millions de cycles)	Ecart-Type (millions de cycles)
Sans interaction	1,73	82,87	-1,04	72,81	44
Avec interaction	2,34	57	-1,53	48,97	22,92

Tableau 4 : Valeurs des paramètres du modèle de Weibull pour l'actionneur selon le profil de mission



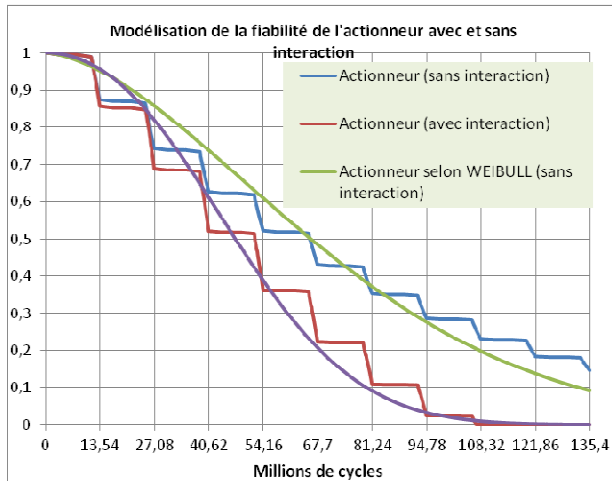


Figure 12 : Modélisation de la fiabilité de l'actionneur intelligent en fonction du **profil de mission sans et avec interaction**

### 3 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons traité le système mécatronique « Actionneur intelligent » par la démarche proposée pour l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques. La première partie de la démarche a permis de modéliser le comportement fonctionnel et dysfonctionnel du système de manière qualitative, alors que dans la seconde partie, les données de fiabilité sur les composants ont été traitées puis injectées dans le modèle de réseau de Petri ou dans le diagramme de fiabilité pour obtenir un modèle stochastique permettant de quantifier la fiabilité à travers le temps.

Le calcul par diagramme de fiabilité ainsi que la simulation du modèle RdP ont permis d'estimer la fiabilité de l'actionneur intelligent et de ses composants pendant les différentes phases d'utilisation (profil chaud, profil tempéré et profil froid) et selon le profil de mission phase par phase sans et avec prise en compte de l'interaction palier/bobine.

L'impact de chaque phase de fonctionnement du profil de mission sur la fiabilité de l'actionneur et de ses composants a été mis en évidence et constitue une aide précieuse à la prise de décision. En effet, dans le cas d'une non-conformité du système en termes de fiabilité, des modifications de conception sont effectuées sur les composants peu fiables (palier de guidage et bobine) afin que les objectifs soient atteints.

Il convient ici de rappeler que les résultats présentés découlent des données d'entrée du modèle dont certaines ont été choisies de manière quasi arbitraire. Les résultats permettent donc de visualiser la tendance de l'évolution.

Enfin, les deux méthodes de calcul, diagramme de fiabilité et RdP/simulation Monte Carlo ont permis de comparer les résultats, vérifier les données et valider les modèles.

### REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'APS (Assemblée des Pays de Savoie) et le CETIM qui financent ce travail dans le cadre d'une thèse de doctorat. Nous remercions également la société Pack'Aero qui nous a permis d'appliquer la méthodologie proposée à l'un de ses produits mécatroniques (actionneur intelligent).

### REFERENCES

- [1] AFNOR. *Mécatronique*, novembre 2008 - vocabulaire. Norme NF E01-010.
- [2] Commault. C, J.M. Dion, A. Perez, juillet 1991. Disturbance rejection for structured systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 36(7):884–887.
- [3] Demri.A, 2009. Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle ; thèse de doctorat, Université d'Angers.
- [4] France Airbus, Eurocopter, Nexter Electronics, MBDA France, Thales Systèmes Aéroportés, Thales Avionics, Thales Research & Technology et Thales Underwater Systems, Guide FIDES, 2009 sous la supervision de la délégation générale pour l'armement mai 2009,464 pages
- [5] IFAC Technical Committees, 2009. [Http: //tc.ifac-control.org/4/2/scope](http://tc.ifac-control.org/4/2/scope).
- [6] Hammouda. N, Habchi. G, Barthod. C, 2013. Mise en œuvre d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes mécatroniques. Participation et présentation d'un article au 21ème Congrès Français de Mécanique à Bordeaux
- [7] Mihalache. A, 2007 ; Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué ; thèse de doctorat, Université d'Angers.
- [8] Moncelet. G, 1998. Application des Réseaux de Petri à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile ; thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [9] R.W Daniel,, J.R. Hewit, 1991.Editorial. *Mechatronics*, 1(1): i-ii.
- [10] "Systèmes dynamiques hybrides", 2000, ouvrage collectif sous la direction de Janan Zaytoon, collection Hermès Science, ISBN 2-7462-0247-6.